

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

**PROVOZNÍ VLASTNOSTI LED A JEJICH
MODELOVÁNÍ**

OPERATIONAL PARAMETERS OF LED
AND THEIR MODELLING

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

TOMÁŠ PAVELKA

Obor: Silnoprúdová elektrotechnika a elektroenergetika
Školitel: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

BRNO 2016

KLÍČOVÁ SLOVA: LED, simulace, model, degradace, statické změny, dynamické změny, optimalizace chladiče, tepelný odpor, tepelná kapacita, kolísání světelného toku

KEY WORDS: LED, simulation, model, degradation, static changes, dynamic changes, heatsink optimization, thermal resistivity, thermal capacity, luminous flux fluctuation

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 TECHNOLOGIE LED	5
2.1 Konstrukce LED	6
2.2 Provozní vlastnosti LED	6
3 PARAMETRY LED	6
3.1 Světelně-technické parametry	7
3.2 Elektrické parametry	7
3.3 Ostatní parametry	7
4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	7
4.1 Specifikace vlivů působících na parametry LED	7
4.2 Analýza degračních mechanismů LED	8
4.3 Vytvoření nového modelu chování LED	8
4.4 Ověření platnosti modelu	8
4.5 Zhodnocení možností uplatnění modelu	8
5 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PARAMETRY LED	8
5.1 Elektrické vlivy	8
5.2 Vliv teploty	9
6 STATICKÝ MODEL CHOVÁNÍ LED	10
6.1 Vstupní parametry modelu	10
6.2 Model	12
6.3 Výsledky získané ze statického modelu chování	13
7 DYNAMICKÝ MODEL CHOVÁNÍ LED	17
7.1 Dynamické změny provozních parametrů	17
7.2 Model	19
7.3 Výsledky získané z dynamického modelu	20
7.4 Shrnutí poznatků z dynamického modelu	24
8 ZÁVĚR	25
8.1 Splnění jednotlivých cílů práce	25
8.2 Shrnutí nových poznatků práce a její přínos	26
8.3 Význam a využití dosažených výsledků	26
8.4 Návrh dalšího postupu	27
POUŽITÁ LITERATURA	28
PUBLIKACE AUTORA	29
ABSTRACT	30

1 ÚVOD

Světlo je jednou ze základních forem energie, kterou člověk vnímá svými smysly. Reakce na světlo se projevuje i u těch nejprimitivnějších forem energie a celý svět a jeho vnímání jsou na světle a jeho interakci s živými i neživými objekty silně závislé. Pro většinu organismů na světě je přirozená interakce se světlem přírodním, které je však závislé na vzájemné poloze Země, Slunce, resp. dalších vesmírných objektů, které osvětlují planetu Zemi bez zásahu člověka. Osvětlení způsobené přírodním světlem se mění v cyklech (dny, roční období) s různými nepravidelnými výchyly, které vznikají v reakci na změny počasí, polohu vesmírných těles, změny v uspořádání osvětleného prostoru. Ovšem pouze člověk využívá vědomě také světlo umělé. Nejprve se naučil využívat oheň jako zdroj světla a tepla, což významně ovlivnilo celý vývoj lidstva až do dnešních dní. Vynález žárovky jako zdroje umělého světla byl významným prvkem technické revoluce v druhé polovině 19. století. Vždyť i rozvoj energetiky byl v počátcích motivován potřebou použití elektrické energie pro napájení osvětlení. Přes prudký rozvoj, který světelná technika prodělala od 19. století až do dnešních dní je zarážející, že žárovka s wolframovým vláknem, která byla představena v roce 1907 [1], překonala bez významnějších technologických změn celé 20. století a používá se i v roce 2015, kdy její použití regulují autority na úrovni některých států, avšak bez těchto regulací by se žárovka používala pro osvětlování jistě ještě dlouhou dobu. Tato situace potvrzuje výjimečnost žárovky jako technického vynálezu.

Přes nesporné výhody žárovky se vývoj světelné techniky nezastavil a pro umělé osvětlení se používá více druhů světelných zdrojů, založených na různých principech vzniku světla. Účinnost přeměny elektrické energie na světlo se neustále zvyšuje, světelné zdroje se stávají komfortnější pro své uživatele, rozšiřuje se variabilita použití světelných zdrojů pro rozmanitější množství světelných aplikací. V nedávné minulosti došlo k prudkému rozvoji využívání polovodičových světelných zdrojů, které se během několika málo roků přesunuly od okrajového zájmu světelné techniky na její výsluní a dnes jsou všeobecně využívány ve všech oblastech osvětlování zejména pro svoji vysokou variabilitu použití a svou vysokou účinnost.

Při posuzování světelných zdrojů a možností jejich využití je z hlediska osvětlovacích soustav nutné sledovat mnoho vlastností, které jsou popsány různými fyzikálními veličinami. Tyto veličiny charakterizují světelné zdroje z hlediska světelného výkonu, energetické účinnosti přeměny elektrické energie na energii světelnou a také z hlediska kvalitativních parametrů emitovaného záření. Predikce těchto veličin však není snadnou záležitostí a stala se úkolem pro mnohá výzkumná pracoviště po celém světě. Pro správné určení budoucích parametrů je nutná znalost vztahů nejen mezi jednotlivými veličinami, ale také vztahů mezi světelně-technickými veličinami a pracovním prostředím, ve kterém je světelný zdroj provozován. Modelování a simulace chování polovodičových světelných zdrojů tak představuje užitečný nástroj pro světelné techniky nejen při návrhu osvětlovacích soustav, ale také při samotném návrhu svítidel.

2 TECHNOLOGIE LED

Světelné zdroje LED (z anglického Light Emitting Diode) jsou polovodičové součástky, jejichž princip vzniku světla je založen na luminiscenčním záření PN přechodu, který je buzen průchodem elektrického proudu. Luminiscence vzniká při rekombinaci párů elektron-díra (díky příměsím) poblíž PN přechodu při průchodu proudu v propustném směru diody [2].

2.1 KONSTRUKCE LED

Z hlediska technologického je základním konstrukčním principem LED epitaxe polovodičových struktur na vhodném substrátu (např. GaAs, GaP). Substrát tu slouží především jako mechanický prvek pro podporu PN přechodu a může tedy mít rozdílnou krystalickou strukturu, než následné epitaxiální vrstvy. P-vrstva je záměrně konstruována co možná nejuzší, aby emitované fotony mohly opustit PN přechod s minimální pravděpodobností opětovné absorpce v materiálu. Pro zajištění, že většina zářivých rekombinací proběhne v P-vrstvě, je N-vrstva silně dopována příměsemi (N⁺). Fotony, které jsou přesto vyzářeny do N-vrstvy, jsou buď absorbovány materiálem, nebo v závislosti na struktuře povrchu a šířky vrstev a substrátu mohou být odrazeny a vyzářeny z PN přechodu [3].

2.2 PROVOZNÍ VLASTNOSTI LED

LED v reálných svítidlech se nepoužívají samostatně, ale vzhledem ke svým rozměrům a konečným možnostem emitovaného záření se obvykle spojují do různých sériovo-paralelních zapojení. Použití sériového zapojení je výhodnější i z hlediska připojení k napájecím obvodům stejnosměrného napětí – LED předřadníkům.

Významným faktorem ovlivňujícím životnost samotného LED předřadníku je použití elektrolytického kondenzátoru v zapojení. Tento kondenzátor slouží zejména k vyrovnání výstupní hodnoty napětí na požadovanou konstantní hodnotu. Jeho použití s sebou však přináší problémy pro návrh samotného předřadníku, kdy životnost této součástky je nejslabším prvkem v celém zapojení a tato součástka má klíčový vliv na provozní spolehlivost předřadníku. Poruchy měničů jsou v 60 % případů způsobeny právě poruchou elektrolytického kondenzátoru, zatímco druhá nejčastější závadová součást (polovodičová spínací součástka) se na poruchách měničů podílí pouze v 31 % případů [4].

V oblasti kolem maxima výstupního světelného toku LED je poměrně malá strmost závislosti světelného toku na výstupním výkonu. Tato skutečnost nabízí možnost eliminace použití elektrolytického kondenzátoru při současném využití regulačního rozsahu výstupního výkonu měniče, avšak bez významnějšího zvlnění emitovaného světelného toku [5].

Samotná provozní teplota LED je velmi proměnná a je nutné na ni nahlížet s porozuměním principu činnosti polovodičových světelných zdrojů. Jejich pracovní teplota se pohybuje v řádu desítek až stovek stupňů Celsia. V takovém případě již teplota okolí (řádově srovnatelná s provozní teplotou) představuje důležitý faktor při provozu.

Obecně lze také předpokládat, že kritickým místem z pohledu provozní teploty je právě PN přechod. Ostatní součásti LED jsou zpravidla z materiálů, které dokáží dobře odolávat působení tepla a navíc právě PN přechod je tím místem, kde se uvolňuje ztrátové teplo při provozu [9].

3 PARAMETRY LED

Tak jako u každého světelného zdroje, nebo u jakéhokoliv zařízení obecně, dochází i u LED zdrojů ke změnám parametrů v průběhu jejich životního cyklu, tedy k postupným dlouhodobým změnám. Ty tedy určují dynamiku stárnutí těchto světelných zdrojů. Samozřejmě i provozní podmínky těchto zdrojů ovlivňují jejich parametry, v tomto případě je však dynamika změn mnohem rychlejší. Z důvodu odlišností těchto dynamických změn je nutné, aby byly známy příčiny těchto změn a také aby byly jasně stanoveny provozní podmínky, za kterých nedojde k významné degradaci parametrů, potažmo až k poškození světelného zdroje a jeho příslušenství.

3.1 SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ PARAMETRY

Světelně-technické parametry popisují výstupní parametry světla vyzařovaného světelným zdrojem. Jsou to veličiny charakterizující množství energie emitované světelným zdrojem ve formě viditelného záření, popisující distribuci světla do okolí světelného zdroje, vliv emitovaného světla na zrakový orgán člověka, barevné a spektrální složení emitovaného světla a efektivitu přeměny elektrické energie na světelné záření. Většina těchto sledovaných parametrů je měřitelná pouze za použití speciálních přístrojů světelné techniky a veličiny popisující tyto parametry jsou často přizpůsobeny právě vjemu zrakovým orgánem člověka, mohou tedy být do určité míry subjektivní.

Nejdůležitější veličinou charakterizující množství emitovaného světla je světelný tok. Kvalitativní parametry světla jsou závislé na spektrálním složení záření a mezi nejdůležitější patří teplota chromatičnosti a index podání barev.

3.2 ELEKTRICKÉ PARAMETRY

Světelné diody jsou samozřejmě spotřebiči elektrické energie, takže jejich elektrické parametry a parametry napájecího zdroje jsou zásadní z hlediska jejich návrhu i provozu. V zásadě platí, že světelné diody jsou spotřebiči využívajícími stejnosměrné napájení, což při provozu v běžných střídavých sítích znamená, že je nutné je pro provoz vybavit předřadníkem, jehož součástí je usměrňovač, který mění střídavé napájecí napětí na stejnosměrné, obvykle také o nižší hodnotě. Tato zařízení pak obsahují celou řadu elektrických prvků, které jsou buď přímo nezbytné pro provoz, nebo jsou nutné pro zachování kvalitativních parametrů napájení a pro eliminaci zpětných negativních vlivů na napájecí síť.

Elektrickými parametry tak jsou zejména elektrické napětí, elektrický proud a elektrický výkon.

3.3 OSTATNÍ PARAMETRY

Ve světelné technice se pro popis některých vlastností využívají specifické veličiny. Pro popis účinnosti světelných zdrojů se obvykle neužívá veličina účinnost, ale veličina měrný výkon. Další veličinou, která je ve světelné technice specifickou pro LED zdroje, je tepelný odpor, který popisuje materiálové vlastnosti některých komponent samotné LED, případně komponent, které jsou nezbytnou součástí LED ve svítidlech, konkrétně chladiče.

4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce si klade za cíl vytvoření obecně využitelného modelu chování světelně-technických parametrů svítivých diod určených pro obecné osvětlování.

4.1 SPECIFIKACE VLIVŮ PŮSOBÍCÍCH NA PARAMETRY LED

Pro vytvoření modelu chování je nutné analyzovat závislosti jednotlivých parametrů na vnějších vlivech i mezi sebou a správně porozumět jejich vzájemným vazbám. Cestou k cíli může být správná interpretace již prozkoumaných prací a studií v této oblasti a ověření předpokladů měření vybraných vzorků.

4.2 ANALÝZA DEGRADAČNÍCH MECHANISMŮ LED

Porozumění degradačním mechanismům dílčích součástí LED umožňuje lépe analyzovat změny parametrů při samotném provozu. Zároveň je vhodné prozkoumat dlouhodobou dynamiku takových změn, která může napomoci k odhadu změn parametrů samotných diod v jednotlivých fázích jejich provozního života.

4.3 VYTVOŘENÍ NOVÉHO MODELU CHOVÁNÍ LED

Jedním z hlavních úkolů této práce je vytvoření matematického modelu chování parametrů LED při provozu. Pro svou dostupnost v akademickém prostředí se pro takový úkol jeví jako perspektivní nástroj programové prostředí Matlab/Simulink. Tento model bude vycházet z verifikovaných informací založených na publikovaných studiích a provedených měřeních, včetně provozních zkušeností. Model umožní dostatečně přesnou predikci světelně-technických parametrů polovodičových světelných zdrojů nejen v ustálených stavech, ale s ohledem na typickou vlastnost LED svítidel, kterou jsou dynamické změny parametrů během činnosti, také v přechodných provozních režimech. Tyto dynamické změny by měly pokrýt nejen procesy dlouhodobé, které jsou spojeny s konvergencí charakteristických veličin k ustáleným hodnotám, ale také procesy velmi rychlých změn parametrů reagujících na okamžité odchylky elektrických veličin napájecích obvodů. Vytvořený model musí umožnit snadnou modifikovatelnost do jiných modelovacích prostředí.

4.4 OVĚŘENÍ PLATNOSTI MODELU

Samotný model musí být prověřen pro běžné provozní stavy, ale jeho platnost vzhledem k zamýšlené univerzálnosti by měla pokrývat i nenominální pracovní režimy.

4.5 ZHODNOCENÍ MOŽNOSTÍ UPLATNĚNÍ MODELU

Vytvořený model bude využit pro analýzu chování LED při různých provozních režimech a různých konfiguracích modelovaného LED systému. V tomto případě model musí umožnit kontrolu kritických veličin, které do značné míry ovlivňují nejen okamžité výstupní světelné parametry, ale mohou být rozhodující z hlediska dlouhodobě stabilní a spolehlivé funkce světelných zdrojů, eventuálně celého svítidla.

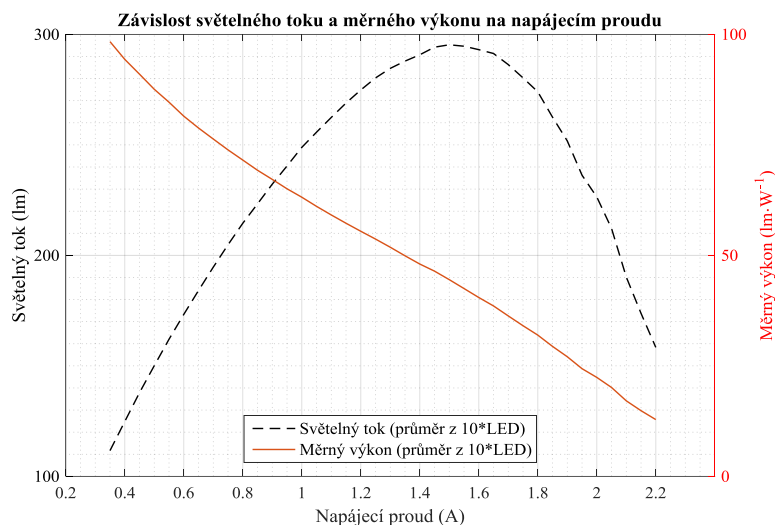
5 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PARAMETRY LED

5.1 ELEKTRICKÉ VLIVY

Při použití diod pro osvětlování se obvykle využívají napájecí zdroje se stabilizací hodnoty proudu a napájecí napětí je nastavováno v určitém rozmezí, které je určeno především šířkou zakázaného pásu diody, a tedy frekvencí emitovaného záření. V některých aplikacích se regulace světelného toku LED provádí tzv. pulsně-širokovou modulací, tedy pulsním napájením s vysokou frekvencí spínání proudu. Taková regulace má vliv na emitovaný světelný tok a při nevhodné frekvenci může docházet k rušivému blikání světla, tzv. flickeru.

Jak lze vidět z Obr. 5-1, i při napájení proudem, který je vyšší, než jmenovitý, dochází k dalšímu nárůstu světelného toku a to až na téměř trojnásobek jmenovité hodnoty při napájení čtyřnásobkem jmenovité hodnoty proudu. Z tohoto hlediska by se mohlo zdát výhodné provozovat LED

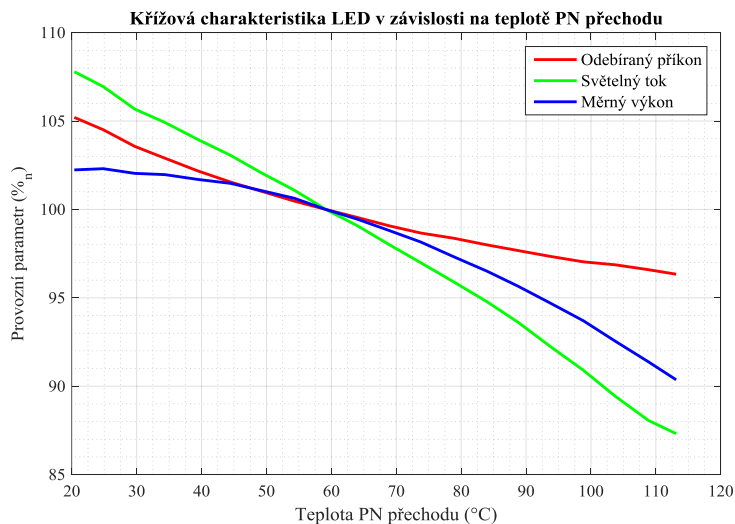
s dostatečným chladičem při vyšších proudových zatíženích, ale kromě snížení životnosti takové LED dochází také k významnému poklesu energetické účinnosti, která je v obrázku reprezentována měrným výkonem diody.



Obr. 5-1: Vliv velikosti napájecího proudu na světelný tok a měrný výkon

5.2 VLIV TEPLOTY

Jedním z provedených měření je ověření vlivu teploty PN přechodu na parametry testovacích diod. Klesající charakter napájecího napětí společně se stabilizovanou hodnotou elektrického proudu poskytuje nelineární průběh poklesu odebíraného příkonu se zvyšující se teplotou PN přechodu, což má pozitivní dopad na degradační křivku měrného výkonu.



Obr. 5-2: Křížová charakteristika provozních parametrů bílé LED v závislosti na teplotě PN přechodu

Pokud by bylo hlavním kritériem provozu LED dosažení co možná nejúčinnějšího provozu, byla by z hlediska měrného výkonu nejvhodnější provozní teplota PN přechodu v rozmezí 40 °C až 70 °C. Kritickou hodnotou teploty PN přechodu, nad kterou dochází k výraznému zrychlení poklesu měrného výkonu LED je hodnota okolo 90 °C.

6 STATICKÝ MODEL CHOVÁNÍ LED

6.1 VSTUPNÍ PARAMETRY MODELU

Statický model chování LED je založen na datech, která lze jednoduše získat od výrobce daného zdroje. V první řadě jsou to elektrické parametry napájecího zdroje. Provozní napětí je obvykle stanoveno v přesně definovaných mezích. Při provozu za skutečných podmínek je provozní napětí závislé nejen na voltampérové charakteristice, ale také na teplotě PN přechodu – se vzrůstající teplotou (při konstantním napájecím proudu) se hodnota provozního napětí snižuje (obvykle nelineárně). Nicméně při vyšších teplotách PN přechodu (vyšších než 60 °C) se tato závislost linearizuje a pokles napětí se zpomaluje [A.6].

Napájecí proud je při provozu obvykle stabilizován na přesné hodnotě napájecím zdrojem. Ve statickém modelu je umožněn lineární nárůst napájecího proudu ve stanoveném rozmezí tak, aby bylo možné simulovat vzrůstající zatížení, resp. provozní zatížení různých úrovní. Napájecí proud a provozní napětí pak umožňují výpočet spotřebovávaného výkonu a s pomocí tepelného koeficientu také hodnotu tepelných ztrát (množství tepla vytvořeného při provozu) [11]:

$$P_h = k_h \cdot P_d = k_h \cdot U_d \cdot I_d, \quad (6.1)$$

kde P_h je tepelný výkon uvolněný v PN přechodu při provozu (W), k_h je tepelný koeficient vyjadřující podíl tepelných ztrát na celkové spotřebované energii (-), P_d je celkový dodaný výkon (W), U_d je provozní napětí (V) a I_d je dodaný napájecí proud (A).

Zbývající množství dodaného výkonu je přeměněno na světlo ve formě světelného toku Φ (lm). Účinnost této přeměny lze vyjádřit jako měrný výkon M_z (lm·W⁻¹). Světelný tok jedné diody pak lze získat z výše uvedených veličin jako:

$$\Phi_1 = P_d \cdot M_z. \quad (6.2)$$

Tepelné ztráty v PN přechodu významným způsobem ovlivňují chování LED. Z tohoto důvodu je nutné odvádět co možná největší množství této tepelné energie z oblasti přechodu do okolního prostoru. Z tohoto důvodu jsou tyto zdroje vybaveny pouzdrem, které umožňuje co možná nejlepší vedení tepla z oblasti PN přechodu do chladiče (potažmo do okolí). V oblasti výzkumu a použití těchto pouzder byli výrobci LED velmi aktivní, zejména v posledních letech (je zde zřejmá souvislost s rapidním nárůstem napájecího výkonu) [12]. Pro vyjádření teplovodivých vlastností materiálů se obvykle využívá veličiny tepelného odporu. V první řadě se jedná o tepelný odpor mezi PN přechodem a pouzdrem LED R_{jc} (°C·W⁻¹) a v druhé řadě se jedná o tepelný odpor mezi místem připojení LED k chladiči a okolím, resp. vnějším povrchem chladiče R_{hs} (°C·W⁻¹). Poslední tepelně vodivá cesta je tvořena spojením vlastního pouzdra LED a chladiče.

Tepelný odpor pouzdra není konstantní za všech provozních stavů. Závislost teplotního odporu pouzdra na teplotě přechodu nemusí být vždy lineární, ale stanovení funkce této závislosti lze dosáhnout pouze měřením, protože její průběh je ovlivňován více vlivy (výkon, velikost pouzdra, rozměry a provedení chladiče, aj.) [11]. Vzhledem k faktu, že sklon závislosti tepelného odporu pouzdra na teplotě přechodu je poměrně mírný, lze v modelu použít lineární aproximaci skutečné funkce [13]:

$$R_{jc} = R_{jc,0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^\alpha, \quad (6.3)$$

kde $R_{jc,0}$ je referenční hodnota tepelného odporu pouzdra ($^{\circ}\text{C W}^{-1}$) při teplotě T_0 ($^{\circ}\text{C}$), T je aktuální teplota pouzdra diody ($^{\circ}\text{C}$) a α je koeficient teplotní závislosti (-).

Určení teploty přechodu lze provést na základě teploty okolí (vhodné zejména při znalosti předpokládaných provozních podmínek), ztrátového tepelného výkonu P_h a hodnot tepelných odporů jednotlivých částí chladičového systému. V první řadě lze provést výpočet teploty chladiče v ustáleném stavu [11]:

$$T_{hs} = T_a + R_{hs} \cdot (N \cdot P_h) = T_a + R_{hs} \cdot (N \cdot k_h \cdot P_d), \quad (6.4)$$

kde T_{hs} je teplota chladiče ($^{\circ}\text{C}$) a N je počet aktivních LED stejného typu osazených na stejném chladiči (-).

Obdobným postupem lze dále určit teplotu PN přechodu [11]:

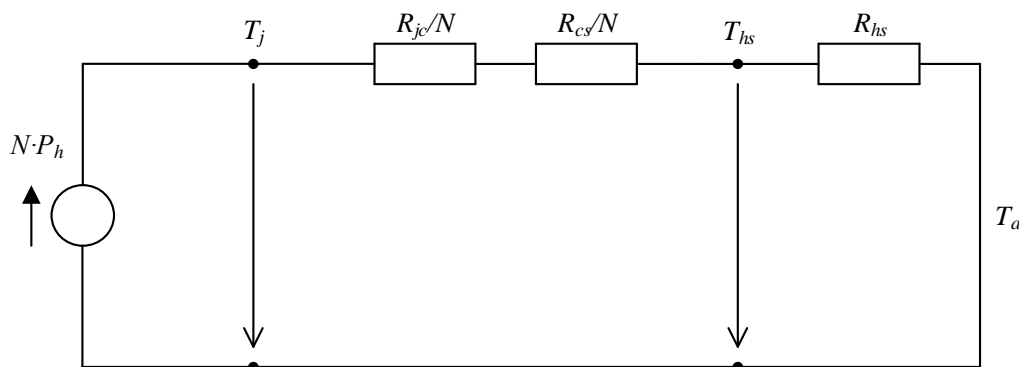
$$T_j = T_{hs} + (R_{jc} + R_{cs}) \cdot P_h, \quad (6.5)$$

kde T_j vyjadřuje teplotu přechodu ($^{\circ}\text{C}$) a R_{cs} je tepelný odpor mezi LED a chladičem ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$).

Dosazením (6.4) do (6.5) pak lze stanovit teplotu přechodu na základě teploty okolí:

$$T_j = T_a + (N \cdot R_{hs} + R_{jc} + R_{cs}) \cdot P_h. \quad (6.6)$$

Ekvivalentní elektrický obvod pro stanovení hodnot teplot v jednotlivých bodech LED systému je zobrazen v Obr. 6-1. Tepelný odpor mezi LED a chladičem R_{cs} je dále zanedbán.



Obr. 6-1: Ekvivalentní elektrický obvod tepelného chování statického modelu

Prvním parametrem záporně ovlivněným nárůstem teploty přechodu je účinnost přeměny elektrické energie na světlo. Redukce této účinnosti (resp. měrného výkonu) způsobuje pokles hodnoty vyzařovaného světelného toku vyzařovaného jednotlivými diodami a zároveň také způsobuje další nárůst množství tepelných ztrát celého systému. V krajním případě tento degradační proces způsobí pokles světelného toku k nule a tím pádem přeměnu veškeré dodané energie na tepelné ztráty. Ve skutečných podmínkách však tento případ nenastane, protože mnohem dříve dojde k poškození, případně ke kompletnímu zničení LED.

Pokles svítivosti LED lze vyjádřit exponenciálně klesající funkcí [5]:

$$I = I_n \cdot e^{-\frac{T_j - T_n}{T_1}}, \quad (6.7)$$

kde I je skutečná hodnota svítivosti (cd) při teplotě přechodu T_j ($^{\circ}\text{C}$), I_n je jmenovitá hodnota svítivosti při jmenovité hodnotě teploty přechodu T_n ($^{\circ}\text{C}$; např. 25°C), T_1 označuje charakteristickou teplotu LED ($^{\circ}\text{C}$).

Při skutečném provozu, zejména v oblasti předpokládaných provozních teplot přechodu (udávaných výrobcem), je však tato závislost téměř lineární a lze ji tedy vyjádřit lineární aproximací skutečného průběhu [5]:

$$M_z = M_{zn} \cdot [1 + k_e \cdot (T_j - T_n)], \quad (6.8)$$

kde M_z je skutečná hodnota měrného výkonu ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$), M_{zn} vyjadřuje jmenovitou hodnotu měrného výkonu ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$) při jmenovité teplotě přechodu T_n ($^{\circ}\text{C}$) a k_e je záporný koeficient poklesu měrného výkonu ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Světelný tok celého systému složeného z N LED zdrojů při konkrétní teplotě přechodu pak může být získán použitím (6.6) a (6.8) v (6.2):

$$\Phi = N \cdot M_{zn} \cdot \{[1 + k_e \cdot (T_a - T_n)] \cdot P_d + k_e \cdot k_h \cdot (N \cdot R_{hs} + R_{jc}) \cdot P_d^2\}. \quad (6.9)$$

6.2 MODEL

První část modelu se věnuje rozdělení dodávaného výkonu. Provozní napětí a napájecí proud jsou nastaveny na jmenovité hodnoty. Lineární růst napájecího proudu vyjadřuje rozsah předpokládaných hodnot proudového zatížení a provozní napětí respektuje závislost napájecího napětí na dodávaném příkonu P_d a teplotě přechodu dle teplotně napěťového koeficientu k_v (viz Tab. 6-1) a samozřejmě také dle voltampérové charakteristiky diody. Vstupním parametrem této části modelu je aktuální hodnota světelné účinnosti η (-), která umožňuje rozdělení dodaného výkonu mezi světelný výstup a tepelné ztráty. Maximální měrný výkon je konstanta ($683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$), která je použita pro výpočet světelného toku z hodnoty zářivého výkonu. Je to hodnota měrného výkonu ideálního světelného zdroje se 100% účinností přeměny elektrické energie na světlo v souladu s křivkou spektrální citlivost normalizovaného. Výstupem této části modelu je hodnota tepelných ztrát výkonu P_h jedné diody a výstupní světelný tok jedné diody Φ_1 .

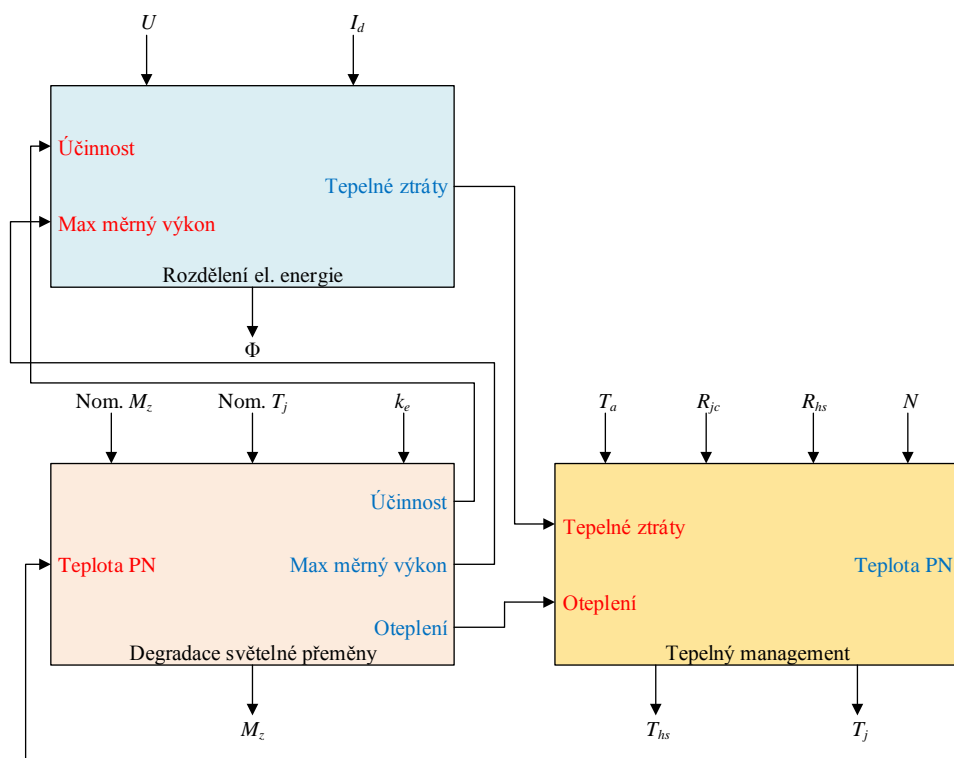
Druhá část modelu popisuje tepelné poměry LED systému. Tepelné ztráty každé diody při provozu způsobují oteplení vlastního PN přechodu na teplotu T_j . Ve skutečných aplikacích (LED svítidlech) je jeden chladič použit pro montáž a chlazení více diod, což se promítne do superpozice tepelných vlivů jednotlivých diod na chladič a teplotu chladiče T_h je tedy nutno určit pro celý systém (model předpokládá N diod stejného typu provozovaných se stejným zatížením P_d). Se vzrůstající provozní teplotou dochází ke zvýšení tepelného odporu pouzdra R_{jc} , což způsobuje další navýšení tepelných ztrát celého systému:

$$R_{jc}^* = R_{jc} \cdot [1 + k_{jc} \cdot (T_j - T_n)], \quad (6.10)$$

kde R_{jc}^* je skutečná (závislá na aktuální teplotě) hodnota tepelného odporu pouzdra R_{jc} ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$) a k_{jc} je koeficient nárůstu tepelného odporu pouzdra ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Hodnota tepelných ztrát (ztrátového výkonu) P_h jedné LED a rozdíl jmenovité (vztažné) teploty T_n a skutečné provozní teploty PN přechodu T_j jsou vstupními parametry této části modelu. Výstupním parametrem této části modelu je skutečná teplota přechodu T_j . Také je v této části vypočtena teplota chladiče T_h , jejíž určení je vhodné zejména pro takové aplikace, kdy je chladič, jako jedna z klíčových částí těla svítidla, vystaven možnosti přímého dotyku uživatelem během provozu.

Třetí část modelu se zabývá tepelnou degradací světelného výstupu, zejména tedy degradací měrného výkonu M_z . Dle vztahu (6.8) dochází k poklesu měrného výkonu v souladu s koeficientem k_e , který je možné zjistit ze specifikací výrobce (resp. ho lze zjistit, či ověřit měřením). Jmenovitá hodnota měrného výkonu M_{zn} je vždy stanovena ke konkrétní hodnotě teploty (obvykle k teplotě okolí 25°C).



Obr. 6-2: Blokové schéma statického modelu chování LED

6.3 VÝSLEDKY ZÍSKANÉ ZE STATICKÉHO MODELU CHOVÁNÍ

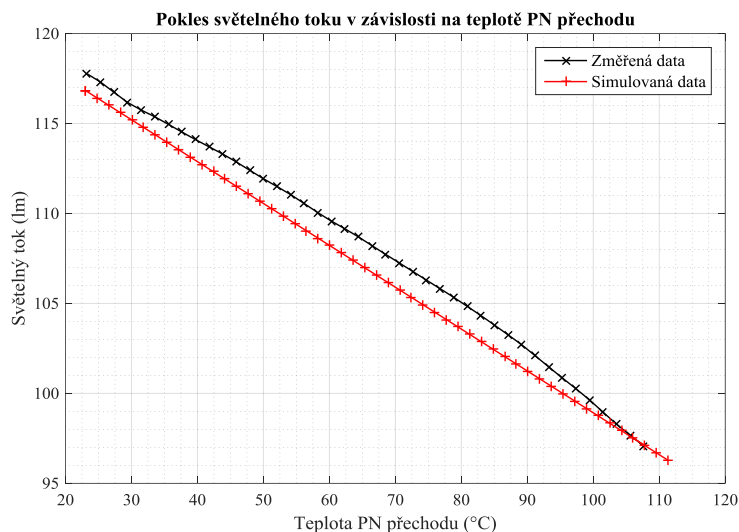
Pro ověření vlastností statického modelu chování LED byl tento konfrontován s výsledky získanými skutečným měřením vzorků vysoce výkonných bílých LED tak, aby bylo možné porovnat výsledky získané simulací a výsledky konkrétního měření. Změřené výsledky jsou získány z měřicího zařízení vybaveného chladičem, který umožňuje stabilizaci teplotních poměrů (zejména tedy stabilizaci teploty PN přechodu) na konkrétní hodnotě při různých provozních stavech.

Dalším vhodným testovacím režimem je použití regulovatelného chladiče pro řízení teploty PN přechodu LED, které jsou provozovány v předpokládaném režimu zatížení, např. tedy při maximálním dovoleném zatížení, nebo v režimu zatížení, který je doporučen jako optimální výrobcem LED. Změna teploty pak může sloužit pro ověření vlastností konkrétního navrhovaného LED svítidla v provozních podmínkách odpovídajících zamýšlenému použití.

Samotné ověření statického modelu proběhlo ve dvou základních testovacích režimech. První test ověřuje rozdíl výsledků získaných simulací a měřeními při doporučeném provozním režimu stanoveném výrobcem diody při proměnné teplotě okolí, resp. s tím spojené proměnné teplotě PN přechodu. Při druhém testu jsou výsledky simulace modelu konfrontovány s naměřenými výsledky při nestandardních provozních podmínkách, konkrétně při zatěžování světelných zdrojů napájecím proudem v rozsahu doporučeném výrobcem i při přetěžování světelných zdrojů proudem výrazně vyšším.

Specifikace konkrétního použitého typu LED jsou stručně uvedeny v Tab. 6-1. Tyto parametry jsou stanoveny pro provozní podmínky odpovídající jmenovité teplotě okolí $T_a = 25\text{ °C}$ a jmenovité hodnotě napájecího proudu $I_d = 350\text{ mA}$. Změřené hodnoty v tomto porovnání jsou již zprůměrovanou hodnotou z 10 vzorků téhož typu diody.

Při prvním testu je tedy provozní režim stanoven jako provoz při konstantní hodnotě napájecího zatížení proudem $I_d = 350$ mA. Degradanční křivka světelného toku Φ_1 v závislosti na teplotě PN přechodu je zobrazena v Obr. 6-3.



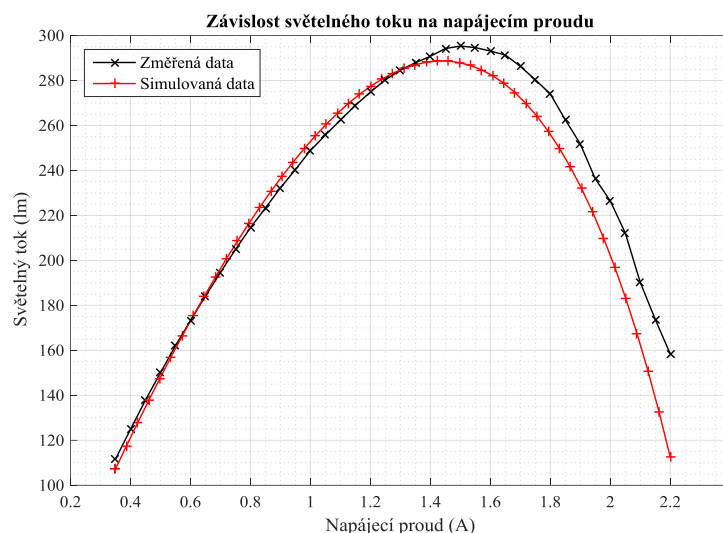
Obr. 6-3: Porovnání změřených a simulovaných výsledků poklesu světelného toku v závislosti na teplotě PN přechodu při jmenovité hodnotě napájecího proudu $I_d = 350$ mA

Při porovnání simulovaných a změřených dat se zdá být model pro požadované účely dostatečně přesný, zejména v rozsahu běžných provozních teplot přechodu. Pro testovanou diodu stanovuje výrobce maximální přípustnou teplotu přechodu při provozu na $T_j = 115$ °C. Jak je vidět v Obr. 6-3, pokles světelného toku při teplotách $T_j > 90$ °C se mírně zrychluje při skutečném provozu. Nicméně maximální odchylka simulovaných hodnot od skutečně změřených nepřekračuje v celém rozsahu testovaných teplot 2 %.

Druhý test modelu se zaměřuje na porovnání skutečných a simulovaných hodnot světelného výstupu LED (světelného toku Φ_1) při zatížení různými hodnotami napájecího proudu. Toto měření bylo provedeno jako test extrémních podmínek pro provoz těchto LED. Maximální napájecí proud stanovený výrobcem je $I_d = 750$ mA (viz Tab. 6-1), tato hodnota byla při měření překročena téměř trojnásobně, jak je vidět v Obr. 6-4.

Tab. 6-1: Specifikace parametrů testovacích LED

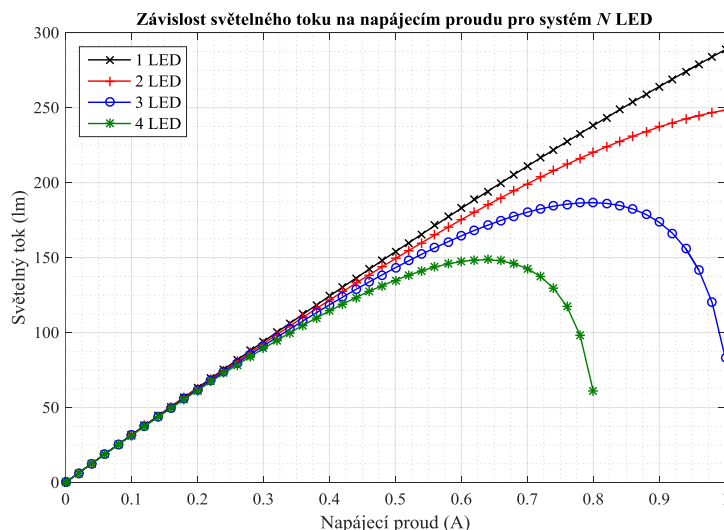
Symbol	Veličina	Hodnota	Jednotka
Φ_1	Světelný tok	100 – 120	lm
U_d	Provozní napětí	3,0 – 3,6	V
I_d	Napájecí proud	100 – 750	mA
R_{jc}	Tepelný odpor pouzdra	12	°C·W ⁻¹
T_a	Provozní teplota	- 40 – 60	°C
k_v	Teplotně-napěťový koeficient	- 5	mV·°C ⁻¹



Obr. 6-4: Porovnání změřených a simulovaných závislostí světelného toku na napájecím proudu

Přesnost predikce závislosti světelného toku na napájecím proudu v rozsahu stanoveném výrobcem diody se ukazuje jako dostatečná. Hlavním přínos takové simulace lze spatřovat v možnosti stanovit maximální hodnotu světelného toku LED provozované při konkrétních provozních podmínkách. Jak je vidět v Obr. 6-4, model predikuje hodnoty světelného toku i při provozu výrazně mimo doporučený rozsah podmínek.

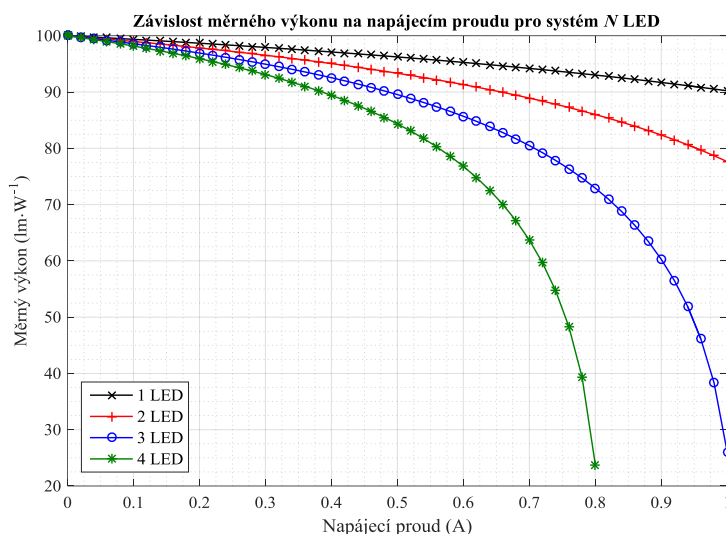
Příkladem využití statického modelu je simulace provozu LED při konstantní teplotě okolí a konstantních podmínkách napájení. V tomto konkrétním případě jsou čtyři diody stejného typu osazeny na společný chladič a napájeny stejným výkonem P_d .



Obr. 6-5: Využití statického modelu pro simulaci závislosti světelného toku na napájecím proudu pro různý počet LED osazených na společném chladiči

Provedená simulace chování tohoto LED systému tedy znázorňuje závislost světelného toku Φ_l (Obr. 6-5) a měrného výkonu M_z (Obr. 6-6) na napájecím proudu I_d pro různý počet diod osazených ke společnému chladiči. Tato simulace poskytuje informace o chladícím potenciálu vybraného chladiče a o možnostech proudového zatížení daného LED systému. Zvolený chladič dokáže odvádět dostatečné množství tepla při jmenovitých podmínkách ($I_d = 350 \text{ mA}$, $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) i v případě použití systému složeného ze čtyř diod osazených na chladiči. Provoz při nadjmenovitých

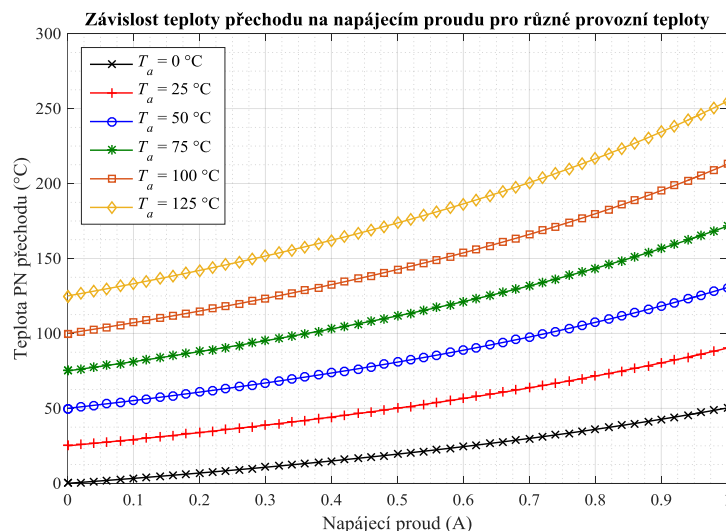
zatíženích by v případě nepřerušovaného napájení po delší dobu způsobil nevratné poškození PN přechodu, což by v extrémním případě vedlo ke zničení některé z diod v systému [10].



Obr. 6-6: Využití statického modelu pro simulaci závislosti měrného výkonu na napájecím proudu pro různý počet LED osazených na společném chladiči

Další simulace umožňuje provedení předběžné kontroly provozní teploty PN přechodu T_j pro různá napájecí zatížení a různé hodnoty provozní teploty okolí T_a , aby bylo možné při návrhu LED systému zhodnotit chladicí možnosti udržení teploty přechodu v mezích stanovených výrobcem.

Z výsledků simulace zobrazených v Obr. 6-7 je zřejmé, že maximální teplota okolí T_a pro provoz diody při napájecím proudu $I_d = 750$ mA je přibližně 60 °C. Při této teplotě okolí se teplota přechodu T_j pohybuje pod hranici 115 °C, která je stanovena výrobcem diody jako maximální.



Obr. 6-7: Využití statického modelu pro simulaci závislosti teploty PN přechodu LED na napájecím proudu pro různé provozní teploty okolí

Statický model umožňuje simulaci provozních parametrů LED připojených ke chladiči s konkrétními vlastnostmi. Provedené simulace také poskytují informace o vzájemných vztazích mezi jednotlivými provozními parametry, a to jak elektrickými, světelnými, ale i teplotními, které jsou pro použití LED v obecném osvětlování velmi důležité. Tyto veličiny a jejich vzájemné

závislosti dokáží poskytnout poměrně přesný odhad chování svítivých diod a jejich souvisejících komponentů, kterými jsou svítidla s LED osazeny.

7 DYNAMICKÝ MODEL CHOVÁNÍ LED

Tepelná kapacita látky je fyzikální veličina vyjadřující množství tepelné energie potřebné ke změně stavu látky o určitý teplotní rozdíl. V případě LED zdrojů se jedná zejména o tepelnou kapacitu pouzdra samotné diody. Z hlediska návrhu chladicího systému LED svítidla je mnohem významnějším parametrem tepelná kapacita samotného chladiče [14].

Ve skutečnosti se jedná o vyjádření množství tepelných ztrát, které je možné v materiálu LED systému absorbovat, aniž by bylo nutné je odvést do okolí.

7.1 DYNAMICKÉ ZMĚNY PROVOZNÍCH PARAMETRŮ

Pro modelování chování LED systému je nutné zahrnout ke statickému modelu vliv časových proměnných, zejména tedy průběh teplotních změn na jednotlivých prvcích systému. Pro ilustraci takového chování je vhodné přistoupit k využití ekvivalentního elektrického obvodu, protože veličiny charakterizující vedení tepla v LED systému se chovají podobně jako prvky elektrických obvodů.

Zdroj tepla, kterým je samotná LED, resp. její PN přechod, kde dochází k vzniku tepelných ztrát, může tedy být v ekvivalentním schématu nahrazen napětovým zdrojem. Jeho výkon je v takovém případě charakterizován ztrátovým tepelným výkonem P_h , který je získán jako ta část celkového spotřebovaného výkonu, která není při provozu LED přeměněna na světelnou energii. V konkrétním modelu je tedy určen podle vztahu (6.1). V případě použití společného chladiče pro systém s více diodami je nutné tento výkon ještě násobit počtem diod N , protože pro celkové ztrátové teplo platí princip superpozice.

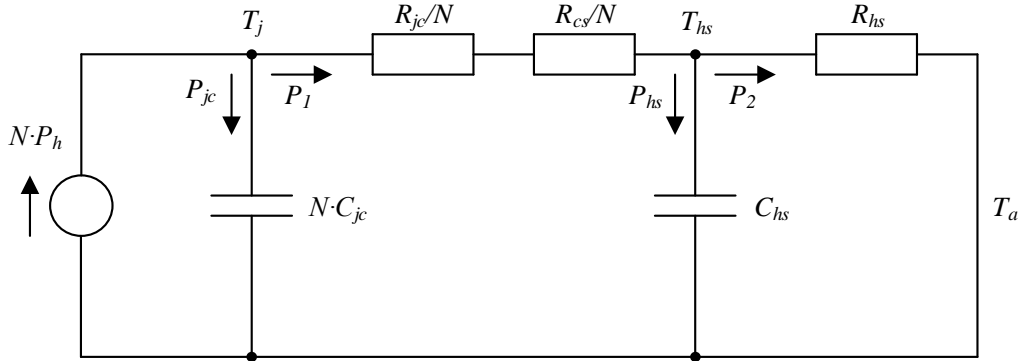
Tepelný odpor pouzdra diody je v ekvivalentním obvodu nahrazen rezistorem R_{jc} . Celkový tepelný výkon je pak rovnoměrně rozdělen do paralelních větví reprezentujících pouzdra jednotlivých diod, jelikož model předpokládá provoz diod stejného provedení. Pokud by to bylo žádoucí, je možné uvažovat i rozdělení obvodu do dílčích smyček představujících jednotlivá provedení pouzder diod. Tepelný odpor pouzdra je obvykle proměnný v závislosti na aktuální teplotě, tato skutečnost je pak vyjádřena násobícím koeficientem k_{jc} , kterým je násobena hodnota tepelného odporu pouzdra R_{jc} .

Tepelná kapacita pouzdra diody je v ekvivalentním obvodu nahrazena kondenzátorem C_{jc} . Tato kapacita je velmi malá, a proto je při provozu tepelný tok touto součástí velmi rychle eliminován a dále veden pouze rezistorem R_{jc} . Vliv této kapacity je tedy významný zejména pro situace, kdy je LED provozována s velmi nízkým zatížením a není osazena na chladiči nezanedbatelných rozměrů, resp. pro diody provozované úplně bez chladiče (kontrolky, stavové indikátory apod.). V případě použití více diod je opět výsledná kapacita udána násobkem jednotlivých kapacit daným počtem diod N .

Tepelný odpor chladiče je v ekvivalentním obvodu představován rezistorem R_{hs} . Jeho velikost je závislá na materiálu chladiče, jeho tvaru, umístění a případně na principu odvodu tepla do okolí.

Tepelná kapacita chladiče je reprezentována kondenzátorem C_{hs} . Jelikož je velikost této kapacity obvykle násobně větší než u kapacity pouzdra LED, je právě tato část obvodu klíčovým prvkem, který se podílí na časové změně tepelných parametrů svítidla.

Posledním prvkem v ekvivalentním elektrickém obvodu je rezistor R_{cs} , který představuje tepelný odpor spojení pouzdra LED s chladičem.



Obr. 7-1: Ekvivalentní elektrický obvod tepelného chování dynamického modelu

Jak vyplývá z Obr. 7-1, lze pro uzel T_j (tedy teplotu PN přechodu) vyjádřit následující vztahy pro dílčí tepelné výkony v tomto uzlu. V první řadě je to vyjádření okamžité hodnoty tepelného výkonu v čase jako funkce tepelné kapacity pouzdra diody, počtu diod a teplotního spádu v tomto uzlu:

$$P_{jc}(t) = N \cdot C_{jc} \cdot \frac{d(T_j - T_a)(t)}{dt}, \quad (7.1)$$

kde $P_{jc}(t)$ je okamžitá hodnota tepelného výkonu pohlcovaného pouzdry diod v čase (W) a t je čas (s).

Pro každý okamžik simulace také musí platit následující energetická bilance:

$$P_{jc}(t) = N \cdot P_h(t) - P_1(t), \quad (7.2)$$

kde $P_1(t)$ je okamžitá hodnota tepelného výkonu přestoupivšího do chladiče systému v čase.

Tento odvedený tepelný výkon lze také vyjádřit jako funkci teplotního spádu mezi teplotou přechodu T_j (°C) a teplotou chladiče T_{hs} (°C) a tepelného odporu teplovodivé cesty $R_{jc} + R_{cs}$ mezi PN přechodem a chladičem:

$$P_1(t) = \frac{(T_j - T_{hs})(t)}{(R_{jc} + R_{cs})(t) \cdot N^{-1}}. \quad (7.3)$$

Pokud se (7.3) dosadí do (7.2), lze výsledný vztah porovnat s (7.1):

$$N \cdot P_h(t) - \frac{(T_j - T_{hs})(t)}{(R_{jc} + R_{cs})(t) \cdot N^{-1}} = N \cdot C_{jc} \cdot \frac{d(T_j - T_a)(t)}{dt}. \quad (7.4)$$

Po úpravě s uvažováním faktu, že teplota okolí T_a je v čase konstantní, lze vztah upravit:

$$\frac{dT_j(t)}{dt} + \frac{T_j(t)}{C_{jc} \cdot (R_{jc} + R_{cs})(t)} = \frac{P_h(t)}{C_{jc}} - \frac{T_{hs}(t)}{C_{jc} \cdot (R_{jc} + R_{cs})(t)}. \quad (7.5)$$

Jak již bylo zmíněno, hodnotu tepelného odporu přechodu mezi pouzdem a chladičem R_{cs} lze zanedbat a výraz $R_{jc} \cdot C_{jc}$ pak lze označit jako tepelnou časovou konstantu pouzdra LED τ_{jc} . Protože je hodnota tepelné časové konstanty pouzdra řádově nižší než tepelná časová konstanta chladiče, mění se okamžitá hodnota teploty přechodu mnohem rychleji než teplota chladiče. V takovém případě je možné pro velmi rychlé změny teploty přechodu považovat teplotu chladiče za konstantní [15] a z (7.5) pak lze vyjádřit vztah pro teplotu PN přechodu:

$$T_j = T_{hs} + P_h \cdot R_{jc} - P_h \cdot R_{jc} \cdot e^{-\frac{t}{R_{jc} \cdot C_{jc}}}. \quad (7.6)$$

Pro uzel T_{hs} vyplývají z Obr. 7-1 další vztahy mezi tepelnými výkony namáhajícími jednotlivé prvky náhradního schématu. V první řadě je to bilanční rovnice vztah pro tepelné výkony:

$$P_1(t) = P_{hs}(t) + P_2(t), \quad (7.7)$$

kde $P_{hs}(t)$ je okamžitá hodnota tepelného výkonu pohlceného chladičem (W) a $P_2(t)$ je okamžitá hodnota tepelného výkonu (W) odvedeného přes tepelný odpor chladiče do okolí.

Pro tepelný výkon pohlcovaný kapacitou chladiče platí vztah obdobný jako v případě (7.1):

$$P_{hs}(t) = C_{hs} \cdot \frac{d(T_{hs} - T_a)(t)}{dt}. \quad (7.8)$$

A zároveň obdobně jako ve vztahu pro tepelný výkon odvedený do chladiče (7.3) lze pro tepelný výkon odvedený přes tepelný odpor chladiče do okolí vyjádřit:

$$P_2(t) = \frac{(T_{hs} - T_a)(t)}{R_{hs}(t)}. \quad (7.9)$$

Do vztahu (7.7) pak lze dosadit za $P_1(t)$ výraz ze vztahu (7.3), za $P_{hs}(t)$ výraz ze vztahu (7.8) a za $P_2(t)$ výraz ze vztahu (7.9):

$$\frac{(T_j - T_{hs})(t)}{(R_{jc} + R_{cs})(t) \cdot N^{-1}} = C_{hs} \cdot \frac{d(T_{hs} - T_a)(t)}{dt} + \frac{(T_{hs} - T_a)(t)}{R_{hs}(t)}. \quad (7.10)$$

Tento vztah lze upravit do tvaru vhodnějšího pro řešení s uvažováním konstantní teploty okolí $T_a = \text{konst.}$:

$$\frac{dT_{hs}(t)}{dt} = \frac{N \cdot T_j(t)}{R_{jc}(t) \cdot C_{hs}} - T_{hs}(t) \cdot \left(\frac{N}{R_{jc}(t) \cdot C_{hs}} + \frac{1}{R_{hs} \cdot C_{hs}} \right) + \frac{T_a}{R_{hs} \cdot C_{hs}}. \quad (7.11)$$

Do vztahu (7.11) lze dále dosadit za teplotu PN přechodu T_j ze vztahu (7.6) opět za předpokladu, že teplota přechodu se mění výrazně rychleji v porovnání s rychlostí změny teploty chladiče.

$$\begin{aligned} \frac{dT_{hs}(t)}{dt} = \frac{N}{R_{jc}(t) \cdot C_{hs}} \cdot \left(T_{hs}(t) + P_h \cdot R_{jc}(t) - P_h \cdot R_{jc}(t) \cdot e^{-\frac{t}{R_{jc}(t) \cdot C_{jc}}} \right) - \\ - T_{hs}(t) \cdot \left(\frac{N}{R_{jc}(t) \cdot C_{hs}} + \frac{1}{R_{hs} \cdot C_{hs}} \right) + \frac{T_a}{R_{hs} \cdot C_{hs}}. \end{aligned} \quad (7.12)$$

Řešením této diferenciální rovnice je vyjádření teploty chladiče T_{hs} v časovém okamžiku t :

$$T_{hs}(t) = T_a + N \cdot P_h \cdot R_{hs} + \frac{N \cdot P_h \cdot R_{hs} \cdot R_{jc}(t) \cdot C_{jc} \cdot e^{-\frac{t}{R_{jc}(t) \cdot C_{jc}}}}{R_{hs} \cdot C_{hs} - R_{jc}(t) \cdot C_{jc}} + C_1 \cdot e^{-\frac{t}{R_{hs} \cdot C_{hs}}}. \quad (7.13)$$

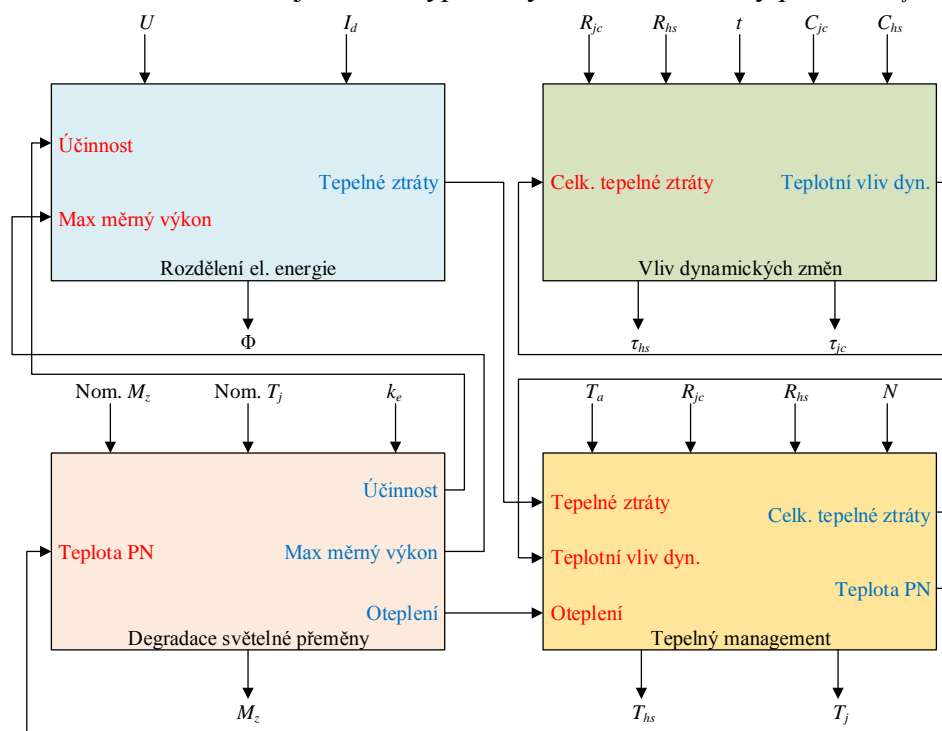
7.2 MODEL

Dynamický model vychází z modelu statického prezentovaného v předchozí kapitole. Část modelu věnující se rozdělení spotřebované elektrické energie LED a část věnující se degradaci výstupních parametrů zůstávají beze změny. Rozdílná je část věnující se tepelnému managementu samotné LED a připojeného chladičového systému.

Časově závislá je v dynamickém modelu tepelná kapacita pouzdra LED C_{jc} , která nabývá poměrně nízké hodnoty. Její vliv v dynamickém modelu je tedy rychle potlačen. Majoritní vliv na dynamické teplotní změny tak má tepelná kapacita chladiče C_{hs} . Distribuce tepla v rámci modelu je současně také závislá na tepelných odporech jednotlivých částí.

V části modelu zabývající se tepelným managementem je vliv dynamických změn teploty přičten k teplotě chladiče dané součtem okolní teploty a tepelného příspěvku ztrát odevzdaných z LED do chladiče. Výstupními veličinami jsou oproti statickému modelu tepelný odpor chladiče R_{hs} , tepelný odpor pouzdra diody R_{jc} a celkový tepelný výkon (ztrátový) všech LED připojených k chladiči $P_h \cdot N$.

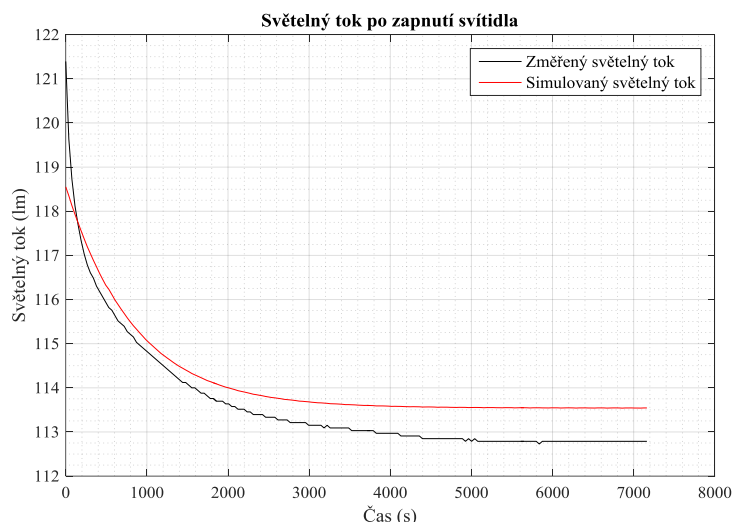
V části modelu věnující se vlivu dynamických změn jsou zadány hodnoty tepelných kapacit chladiče a pouzdra LED a zároveň jsou zde vypočteny časové konstanty pouzdra τ_{jc} a chladiče τ_{hs} .



Obr. 7-2: Blokové přehledové schéma dynamického modelu chování LED

7.3 VÝSLEDKY ZÍSKANÉ Z DYNAMICKÉHO MODELU

Pro ověření modelu ustálení světelného toku při provozu byly testovací LED osazeny na hliníkový chladič s žebrováním pro zlepšení přenosu tepla do okolí o rozměrech 90 x 90 x 60 mm, tepelným odporem $R_{hs} = 3,6 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ a tepelnou kapacitou $C_{hs} = 420 \text{ J}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$. Změřená závislost je průměrem ze tří měření totožných LED při stabilních laboratorních podmínkách. Při ověřování byly zaznamenávány hodnoty světelného toku v intervalu 30 s.



Obr. 7-3: Porovnání změřeného a simulovaného časového průběhu světelného toku po zapnutí svítidla

V Obr. 7-3 je porovnán pokles světelného toku po zapnutí svítidla při simulaci a při skutečném provozu. Nejvyšší odchylka nastává hned po zapnutí, konkrétně dosahuje hodnoty 2,5 %, přibližně po minutě provozu již ale odchylka klesá pod 1 %. Taková přesnost je dostatečná, ale je nutné podotknout, že měření bylo provedeno v laboratorních podmínkách, při konstantní teplotě okolí, bez vlivů jiných tepelných zdrojů, měnicího se proudění vzduchu a v jedné definované pracovní poloze.

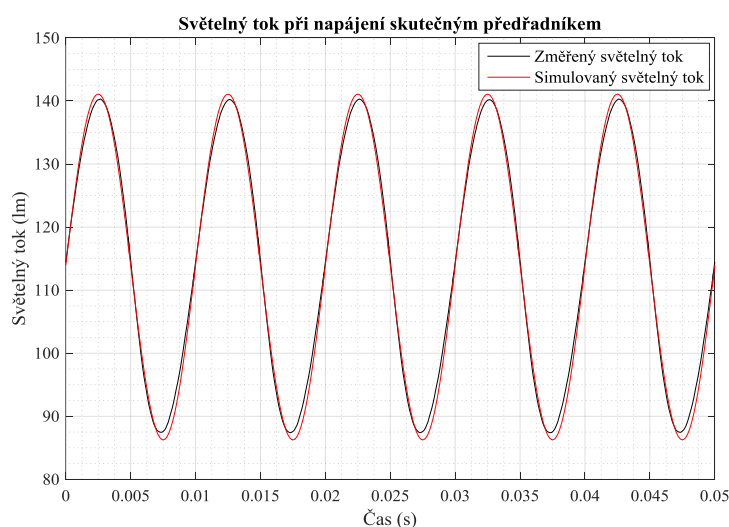
Další test byl proveden se skutečným předřadníkem (AC/DC) určeným pro LED svítidla, konkrétně s výrobkem Fuhua Electronic UEL035-D2. Parametry tohoto předřadníku jsou uvedeny v Tab. 7-1.

Při tomto testu byl měřen světelný tok LED a zároveň byl osciloskopem zaznamenán průběh výstupního proudu předřadníku. Záznam výstupního proudu předřadníku byl poté využit jako vstupní funkce modelu, konkrétně napájecí proud.

Tab. 7-1: Specifikace předřadníku Fuhua Electronic UEL035-D2

Parametr	Hodnota
Výstupní napětí	28 - 100 V (± 5 %)
Výstupní proud	350 mA (± 8 %)
Jmenovitý výkon	35 W
Účinnost	87 – 88 %

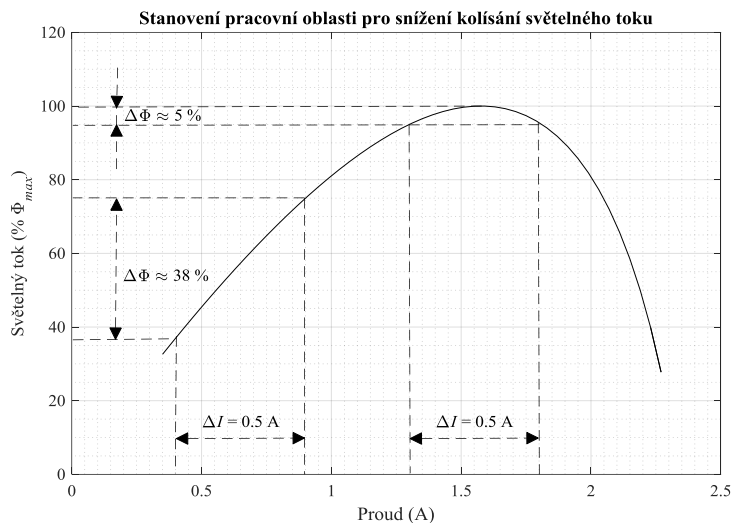
Vzhledem k přímé souvislosti světelného toku s napájecím proudem se přesnost modelu při rychlém kolísání prokázala jako dostatečná. Srovnání změřeného a simulovaného průběhu světelného toku je prezentováno v Obr. 7-4.



Obr. 7-4: Porovnání kolísání změřeného a simulovaného světelného toku při napájení skutečným předřadníkem

Důvodem pro ověření přesnosti modelu i z hlediska velmi rychlých změn světelného toku (kolísání) je zamýšlená možnost stanovení pracovní oblasti LED do oblasti vrcholu světelného vyzařování diody. Tato možnost reaguje na úvahy některých studií [6] - [8] zabývajících se možnostmi eliminace elektrolytického kondenzátoru z předřadníku a jeho nahrazení kondenzátorem s mnohem vyšší životností a tepelnou odolností (keramický, fóliový). Další možností využití tohoto principu spočívá v možné regulaci zatížení elektrizační soustavy pomocí sítí veřejného osvětlení. V takovém případě by bylo možné i při měnícím se zatížení svítidel udržet konstantní úroveň osvětlenosti a napomoci tak k regulaci elektrizační soustavy z hlediska velmi rychlých změn.

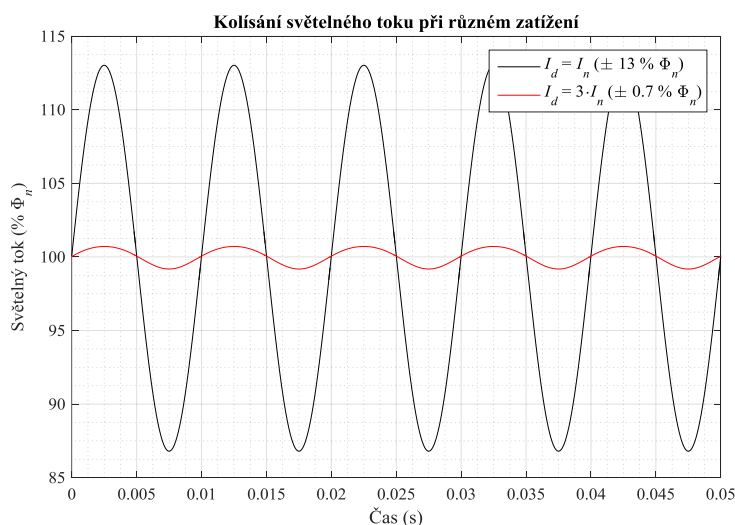
Podstata uvedeného principu je znázorněna v Obr. 7-5. Průběh světelného toku v závislosti na proudovém zatížení byl převzat z měření testovacích LED. Jsou zde naznačeny dva provozní stavy. První stav je provoz diody v oblasti lineárního nárůstu světelného toku s rostoucím zatížením.



Obr. 7-5: Stanovení oblasti pracovního zatížení jako možnost ke stabilizaci světelného toku při napájení předřadníkem s omezenou možností stabilizace výstupního proudu

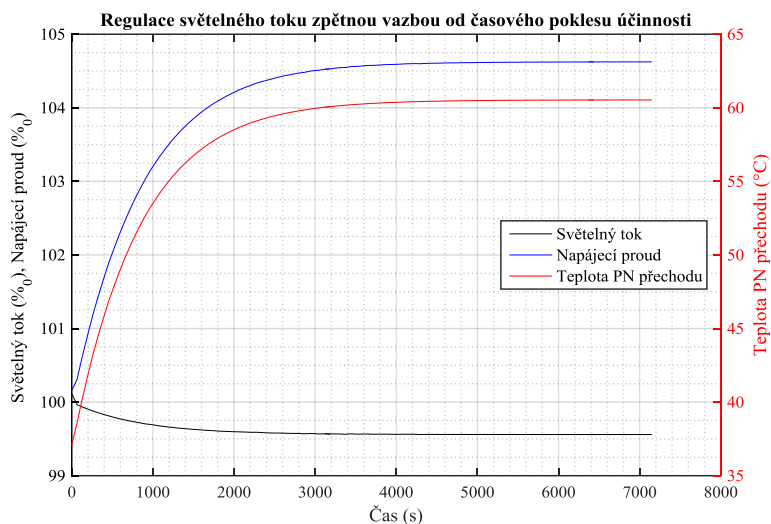
Naproti tomu v případě provozu při zvýšeném zatížení v oblasti maximální dosažitelné hodnoty světelného výstupu nastane při stejném rozptýlu napájecího proudu změna světelného toku v rozmezí přibližně $\Delta\Phi = 5\%$ hodnoty maximální.

Výsledek stabilizace hodnoty světelného toku při provozu LED v pracovní oblasti maximálního světelného výstupu je znázorněna v Obr. 7-6. V prvním případě je LED provozována v oblasti lineárního nárůstu světelného toku v závislosti na napájecím proudu. Střední hodnota tohoto proudu je I_n a jeho zvlnění dosahuje $\pm 20\%$. V druhém případě je střední hodnota napájecího proudu $3 \cdot I_n$ se stejnou mírou zvlnění, tedy $\pm 20\%$ střední hodnoty. Zatímco v prvním případě dosahuje zvlnění světelného toku přibližně 13 % své střední hodnoty, v případě druhém se míra zvlnění světelného toku pohybuje pod 1 % střední hodnoty. Takový průběh světelného toku lze ve skutečném provozu považovat za velmi dobře stabilizovaný.



Obr. 7-6: Kolísání světelného toku v různých režimech provozního zatížení

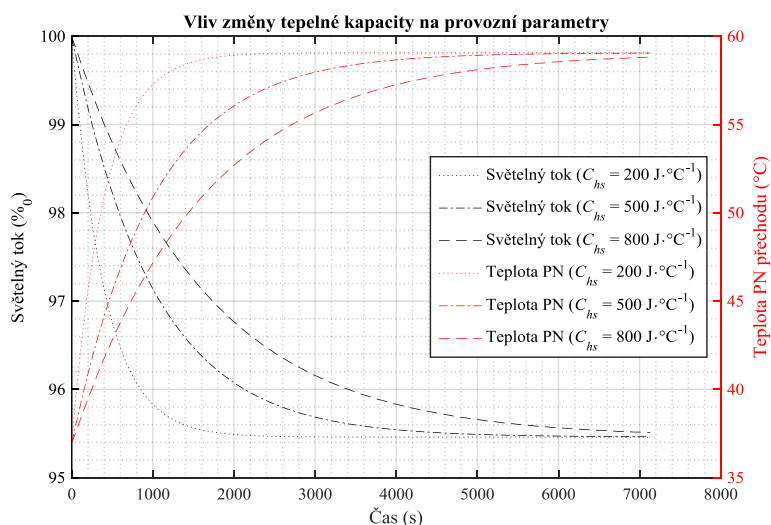
V případě požadavku na stabilizaci hodnoty světelného toku na konstantní hodnotě je možné využít princip regulace napájecího proudu. V takovém případě je možné od poklesu účinnosti pomocí zpětné vazby regulovat výstupní hodnotu napájecího proudu a tím zvýšit celkový výkon svítidla, čímž dojde i ke zvýšení hodnoty světelného.



Obr. 7-7: Eliminace časového poklesu světelného toku zpětnovazební regulací napájecího proudu od poklesu účinnosti

Výsledky simulace provozu modelovaného LED svítidla se zpětnovazební regulací jsou prezentovány v Obr. 7-7. Pokud se stoupající teplotou PN přechodu zvyšujeme úměrně i napájecí proud (zpětná vazba pro regulaci proudu je přivedena od okamžité hodnoty účinnosti světlené přeměny), dochází ke snížení poklesu světelného toku.

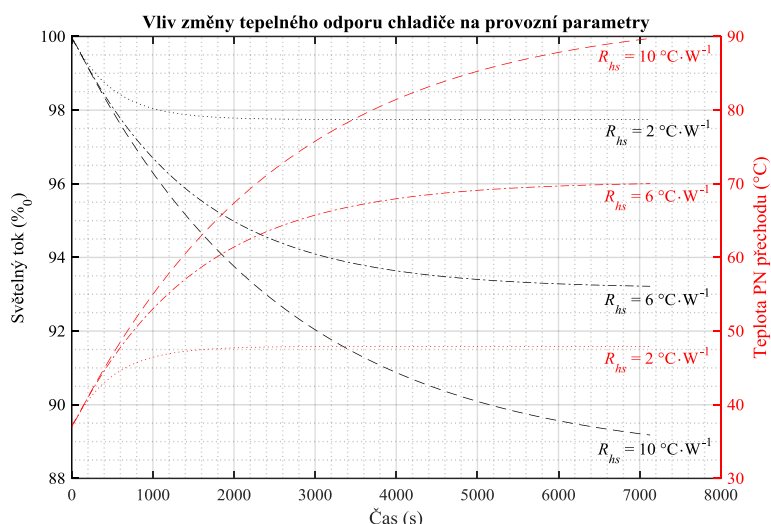
Další využití modelu souvisí přímo s návrhem chladičového systému pro svítidlo. Vliv tepelné kapacity chladiče z hlediska změny provozních parametrů působí jen na rychlost dosažení ustáleného stavu. Výsledek simulace modelového příkladu je znázorněn v Obr. 7-8. V tomto případě se mění velikost chladiče, ale jeho tepelný odpor zůstává konstantní ($R_{hs} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$). Jak lze vidět, výsledné hodnoty teplot PN přechodů i světelných toků svítidel s jednotlivými chladiči se ustálí na stejných hodnotách ve všech případech, mění se pouze čas, za který je ustáleného stavu dosaženo.



Obr. 7-8: Vliv tepelné kapacity chladiče na provozní parametry

Čistě z hlediska provozu svítidla je ideální, aby k ustálení došlo v co nejkratší době a tedy aby tepelná kapacita byla minimální. To je samozřejmě výhodné i z hlediska konstrukčního (minimalizace hmotnosti svítidla) a ekonomického (minimalizace nákladů na materiál chladiče).

Změna tepelného odporu chladiče pak ovlivňuje nejen dobu do ustálení parametrů, ale také výslednou hodnotu těchto parametrů. Výsledky simulace modelu s různými tepelnými odpory chladiče jsou představeny v Obr. 7-9.



Obr. 7-9: Vliv tepelného odporu chladiče na provozní parametry

Z uvedených výsledků simulací je evidentní, že tepelný odpor chladiče by měl být pro svítidlo co nejmenší. Z hlediska návrhu svítidla je tedy díky dynamickému modelu chování LED parametrů možné ověřit simulací tepelné vlastnosti chladičského systému pro konkrétní konstrukční provedení a to na základě snadno dostupných informací.

7.4 SHRNUTÍ POZNATKŮ Z DYNAMICKÉHO MODELU

Dynamický model v představeném provedení pokrývá nedostatky modelu statického, jak byly na konci stati o statickém modelu představeny. V modelu jsou zahrnuty časové změny parametrů, které nastávají v průběhu provozu ve světelných zdrojích, ale i v dalších částech svítidla. Důležitými faktory ovlivňujícími časový průběh parametrů jsou tepelné kapacity jednotlivých komponent svítidla, nejvýznamnější vliv představuje největší tepelná kapacita, tedy tepelná kapacita chladiče.

Samotné rozšíření modelu o dynamické vlivy bylo provedeno na základě matematického řešení ekvivalentního elektrického obvodu představujícího tepelné chování LED svítidla. Díky začlenění dynamických změn do stávajícího provedení statického modelu je nadále možné využívat veškeré možnosti modelu statického, jak byly představeny v příslušné kapitole, pro takové použití stačí anulování časově proměnných parametrů.

Dynamický model byl ověřen pro dva základní provozní stavy, prvním z nich je tepelné ustálení parametrů svítidla s LED zdroji po zapnutí a druhým je sledování velmi rychlých změn parametrů napájecího obvodu, které představuje nestabilitu výstupního proudu předřadníku svítidla. V obou ověřovacích testech se simulace provedená modelem jeví jako dostatečně přesná pro zamýšlené využití, tedy pro ověření chování kompletního svítidla s posuzovanými LED zdroji při provozu v mezích doporučených výrobcem LED, ale částečně i mimo tyto meze.

Využití dynamického modelu pak lze spatřovat v ověření možností chladicího systému a jeho optimalizace před fází samotného konstrukčního návrhu. Model v tomto režimu dokáže na základě vstupních parametrů jednotlivých komponent svítidla určit světelně-technické parametry, jako jsou světelný tok, účinnost, měrný výkon, teplota PN přechodu, teplota chladiče aj., v průběhu provozu a jejich postupný vývoj v čase až do ustáleného stavu.

Díky funkčnosti v oblasti rychlých změn světelného toku model umožňuje prozkoumat možnost provozu LED v oblasti maximálního světelného potenciálu, čímž je možné omezit kolísání světelného toku. Takové řešení by umožnilo využít konstrukčně jednodušších a tudíž levnějších předřadníků, jejichž nevýhoda pramení právě z nedostatečné stabilizace výstupního proudu. Další zajímavou možností takového provozu je použití kondenzátorů jiných konstrukcí, než elektrolytických v zapojení samotného předřadníku.

Model také představuje možnost pro stanovení regulačních funkcí pro navrhované svítidlo s úmyslem stabilizace střední hodnoty světelného toku v průběhu provozu svítidla.

8 ZÁVĚR

8.1 SPLNĚNÍ JEDNOTLIVÝCH CÍLŮ PRÁCE

V práci byly vytyčeny základní cíle, kterých by mělo být dosaženo. Prvním z nich byla specifikace faktorů ovlivňujících světelně-technické parametry. Studium použité literatury byly identifikovány klíčové vlivy, kterými jsou v případě LED provozní teplota PN přechodu a hodnota procházejícího proudu. Vliv těchto proměnných byl analyzován experimentálně na vybraných vzorcích, což umožnilo stanovit míru změn, které jsou těmito faktory způsobeny a také lépe porozumět jednotlivým principům, které se podílí na výsledných změnách.

Studium degračních procesů, které probíhají u svítivých diod, napomohlo zejména k eliminaci dílčích proměnných, které na okamžité provozní parametry LED nemají zásadní vliv, ale jejichž působení se projevuje až při dlouhodobém provozu.

S pomocí zjištěných závislostí byl vytvořen model chování LED pro různé provozní stavy v prostředí Matlab/Simulink. Model pracuje s parametry, které jsou dostupné přímo ze specifikací výrobce diody, případně s parametry, které lze jednoduchým měřením ověřit. Díky tomu je model snadno aplikovatelný pro většinu dostupných LED, které se pro obecné osvětlování využívají. Model umožňuje na základě vstupních parametrů stanovit základní stavové veličiny, zejména teploty PN přechodu a připojeného chladiče, jejich vývoj v čase a také okamžitý stav emitovaného světelného toku. Model svým provedením umožňuje nejen ověření statických změn, jako jsou změny elektrických veličin napájecích zdrojů, ale pokrývá i velmi rychlé dynamické změny, které jsou u LED svítidel nejčastěji důsledkem nestabilních parametrů napájecích obvodů.

Pro základní provozní režimy byl model ověřen srovnáním s měřením v laboratorních podmínkách, navíc model prokázal svou platnost i v nestandardních pracovních režimech, které mohou nastat nejen vlivem napájecích obvodů, ale také vlivem okolního prostředí, ve kterém LED pracují.

Na základě uvedených faktů lze považovat cíle disertační práce za splněné.

8.2 SHRnutí NOVÝCH POZNATKŮ PRÁCE A JEJÍ PŘÍNOS

Přínos disertační práce spočívá zejména ve vytvoření matematického modelu, který na základě zjištěných a ověřených závislostí predikuje chování samotných diod, ale také souvisejících součástí svítidla, které jsou pro osvětlování pomocí LED technologie nezbytné. Pro matematické vyjádření vzájemných souvislostí bylo využito ekvivalentního elektrického obvodu, ve kterém jsou k veličinám reprezentujícím tepelné chování svítidla přiřazeny zástupné veličiny elektrotechnické. Takový obvod pak lze řešit na základě obecně platných pravidel pro analýzu elektrických obvodů. Platnost takového řešení byla potvrzena kontrolními měřeními.

Novým řešením v této oblasti je implementace tepelných vlastností samotného pouzdra LED do tepelného managementu modelu. To je důležité zejména pro aplikace, ve kterých se LED osazují na desky plošných spojů bez chladicího příspěvku masivního chladiče. V takových režimech se právě pouzdro diody podílí většinou měrou na odvodu vzniklých tepelných ztrát. Jediný model je tak univerzální pro různá konstrukční provedení LED i pro různá provedení chladicích systémů, která jsou u dnešních LED svítidel používána.

Přínosem představeného řešení je snadná modifikovatelnost do jiných modelačních prostředí, protože představené řešení je rozpracováno tak, aby využívalo základních matematických operací, které jsou dostupné napříč různými modelovacími nástroji.

Dílním přínosem a novým poznatkem je také upřesnění vzájemných závislostí, které byly zjištěny při měření. Zatímco dosavadní studie uvádí, že s rostoucí teplotou PN přechodu dochází k lineárnímu poklesu napětí na diodě, při měření bylo zjištěno, že takové řešení je nepřesné. Proto by teplotní závislost napětí na diodě měla být namísto teplotně-napěťového koeficientu vyjádřena přesnou funkcí. Takové řešení je výhodnější zejména při výzkumu LED, kdy je na základě teplotně-napěťového koeficientu určována teplota PN přechodu.

Poznatkem vyplývajícím z provedených měření je diferenciací jednotlivých vnitřních vlivů, díky níž byl prokázán významnější vliv na degradaci parametrů ze strany vysoké teploty PN přechodu, než ze strany velikosti napájecího proudu. Zejména v oblasti změn spektrálního složení emitovaného záření je teplota mnohem významnějším faktorem, než napájecí proud. Změna spektrální charakteristiky má při provozu vliv zejména na kvalitativní parametry, tedy na index podání barev a na teplotu chromatičnosti.

8.3 VÝZNAM A VYUŽITÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Vytvořený model je využitelný zejména pro ověření chladicího systému pro zamýšlenou variantu provedení svítidla. Rozdílný počet světelných diod v zapojení svítidla značně ovlivňuje velikost a provedení chladiče, kterou je nutné přizpůsobit tak, aby byl zaručen stabilní a dlouhodobě spolehlivý chod při požadovaném světelném výkonu. V tomto případě model umožňuje rychlé vyhodnocení konkrétní varianty a kontrolu parametrů, zejména jejich soulad s doporučeními výrobce, pokud je to žádoucí.

Další možností je výkonová analýza navrženého svítidla s ohledem na okolní parametry, ve kterých bude zamýšlené svítidlo pracovat. Vzhledem k nízkým pracovním teplotám LED v porovnání s konvenčními světelnými zdroji právě teplota okolí může významným způsobem ovlivnit světelně-technické parametry světelných zdrojů při různých pracovních režimech. Současně se zjištěným faktem, že výraznější negativní vliv má vysoká teplota, než napájecí proud se také

otevřít možnost zvýšení výkonového zatížení LED, pokud je zabezpečen dostatečně kvalitní chladič systém pro odvod ztrátového tepla ze světelně aktivní oblasti.

Vzhledem k funkčnosti modelu i v oblasti dynamických změn parametrů během provozu světelných zdrojů může být model použit pro nalezení optimální provozní oblasti, při které je dosahováno nejlepší energetické účinnosti. Současně ale také lze hledat pracovní bod jiný a to takový, při kterém i při nestabilní hodnotě napájecího proudu dochází k minimálnímu zvlnění emitovaného světelného toku. Takový pracovní režim umožní provoz LED i s méně sofistikovaným (a samozřejmě levnějším) předřadníkem, případně by mohl být cestou k záměně elektrolytických kondenzátorů v zapojení předřadníků za časově stabilnější varianty. Takové řešení by otevřelo cestu k dosahování životnosti svítidel, která by násobně přesáhla životnost současných konvenčních aplikací, která je často omezena právě životností elektrolytického kondenzátoru.

S rozšířením LED technologií do všech oblastí osvětlování se tato technologie dostává do popředí zájmu i v oblasti veřejného osvětlování. Z tohoto pohledu by výše uvedený přístup provozu při měnícím se zatížení mohl být využit v případě masivního nasazení i pro regulaci zatížení v elektrických sítích, což je téma v dnešní době velice aktuální, zejména s ohledem na probíhající decentralizaci elektroenergetiky a rozsáhlou integraci těžce predikovatelných obnovitelných zdrojů elektrické energie do elektrizační soustavy.

Často zmiňovaným nedostatkem polovodičových svítidel používaných pro obecné osvětlování je nestabilita úrovně osvětlení v takových soustavách. V tomto ohledu lze přínos simulace navrhovaného svítidla v představeném modelu spatřovat v možnosti stanovení zpětnovazební regulační funkce, která by mohla být implementována do napájecího zdroje a tím stabilizovat střední hodnotu světelného toku svítidla.

8.4 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU

Navržené řešení modelu dokáže predikovat klíčové parametry z hlediska návrhu osvětlovací soustavy a to zejména výstupní světelný výkon (světelný tok) a energetickou účinnost emise světla (měrný výkon). Současně ale v dnešní době rostou nároky zákazníků na stabilitu kvalitativních parametrů osvětlení, která je závislá na spektrálním složení emitovaného záření. Další práce by se tak mohly zaměřit na implementaci provozních vlivů právě na spektrální složení. Hlavním problémem takového postupu však je rozdílnost jednotlivých provedení diod, čímž takový model v první řadě ztrácí na univerzálnosti použití a v druhé řadě je obtížné tyto závislosti pro jednotlivé vlivy kvantifikovat.

Další rozsáhlou oblastí zájmu výzkumu LED jsou dlouhodobé degradační mechanismy diod. Některé současné přístupy byly představeny v této práci, ale vzhledem k časové náročnosti ověřování takových modelů nebyly v této práci použity. Navazující práce by se tak mohly zaměřit na propojení představeného modelu, jako krátkodobé součásti širšího projektu, s dlouhodobým degradačním modelem, čímž by světelný technik dostal do rukou univerzální nástroj, který by dokázal popsat vlastnosti LED v průběhu celého životního cyklu světelného zdroje.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MIKEŠ, J., EFMERTO VÁ, M. Cesta žárovky historií. Strípky světla zapomenutého prvenství. *Světlo* (2005) č.:04, FCC Public, Praha 2005, ISSN 1212-0812
- [2] DUPUIS, R. D., KRAMES, M. R., History, Development, and Applications of High-Brightness Visible Light-Emitting Diodes, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 9, 2008, pp. 1154 - 1171
- [3] KASAP, S., O., PN junction devices and light emitting diodes, *pn Junction Devices – An e-Booklet*, pp. 17, 2001
- [4] PANG, H.M.; BRYAN, P.M.H., "A life prediction scheme for electrolytic capacitors in power converters without current sensor," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE*, vol., no., pp.973,979, 21-25 Feb. 2010
- [5] HUI, S.Y.R.; HUANTING CHEN; XUEHUI TAO, "An Extended Photoelectrothermal Theory for LED Systems: A Tutorial From Device Characteristic to System Design for General Lighting," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.27, no.11, pp.4571,4583, Nov. 2012
- [6] QIN, Y.X.; CHUNG, H.S.H.; LIN, D.Y.; HUI, S.Y.R., "Current source ballast for high power lighting emitting diodes without electrolytic capacitor," *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE*, vol., no., pp.1968,1973, 10-13 Nov. 2008
- [7] B. WANG, X. RUAN, K. YAO, AND M. XU, "A method of reducing the peak-to-average ratio of LED current for electrolytic capacitor-less AC–DC drivers," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 3, pp. 592–601, Mar. 2010.
- [8] LINLIN GU; XINBO RUAN; MING XU; KAI YAO, "Means of Eliminating Electrolytic Capacitor in AC/DC Power Supplies for LED Lightings," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.24, no.5, pp.1399,1408, May 2009
- [9] FUMAGALLI, KIM, ROBERTO FARANDA, LORENZO FARNE, W. L. TSAI A T. J. CHEN. Analysis of possible LED failure mode.2014 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe. IEEE, 2014, s. 1-8. DOI: 10.1109/PCICEurope.2014.6900068.
- [10] YANG, L., HU, J., & SHIN, M. W., "Degradation of high power LEDs at dynamic working conditions," *Solid-State Electronics*, 53(6), 567-570, 2009
- [11] HUI, S., QIN, Y. "A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (LED) systems," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE*, Feb 2009, pp. 554–562
- [12] JAYASINGHE, L., DONG, T., NARENDHAN, N. "Is the thermal resistance coefficient of high-power LEDs constant?" pp. 666911–666911–6, 2007
- [13] J. C. J. PAASSCHENS, S. HARMSMA AND R. VAN DER TOORN, "Dependence of thermal resistance on ambient and actual temperature," *Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology, 2004. Proceedings of the 2004 Meeting*, 2004, pp. 96-99
- [14] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. "Fyzika II: Mechanika, Termodynamika. " 1. vyd. Brno: Vutium, Prometheus, 2000, ISBN 978-80-214-4123-1
- [15] XUEHUI TAO; HUI, S.Y.R., "Dynamic Photoelectrothermal Theory for Light-Emitting Diode Systems," in *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.59, no.4, pp.1751-1759, 2012

PUBLIKACE AUTORA

- [A.1] PAVELKA, T.; PTÁČEK, M., BAXANT, P. "Static model of LED behaviour depending on operating conditions." *Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Prague, Czech Republic: Czech Technical University in Prague, 2016. pp. 480-484, ISBN: 978-1-5090-0907-7.
- [A.2] PTÁČEK, M., KOPIČKA, M., PAVELKA, T.; RADIL, L. "Modelling of Small Wind Power Plant with Savonius-Darrieus Rotor in the PSCAD." *Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Prague, Czech Republic: Czech Technical University in Prague, 2016. pp. 204-209, ISBN: 978-1-5090-0907-7.
- [A.3] PAVELKA, T., ŠKODA, J., BAXANT, P. "Historie světelných diod LED." *Světlo*, 2016, roč. 2016, č. 2, s. 26-28. ISSN: 1212-0812.
- [A.4] PAVELKA, T.; PTÁČEK, M. "Degradation of LED parameters during operation: Brief review of currently used models and measuring methods." *Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Ostrava, Czech Republic: VŠB-TU Ostrava, 2015. pp. 523-526, ISBN: 978-1-4673-6787-5.
- [A.5] ŠKODA, J.; SUMEC, S.; BAXANT, P.; KRBAL, M.; PAVELKA, T. "Porovnání LED s konvenčními světelnými zdroji." *Světlo*, 2015, roč. 6, č. 3/ 2015, s. 60-62. ISSN: 1212-0812.
- [A.6] PAVELKA, T.; DOLEŽAL, P.; SLÁMA, P. "Parameters of white LEDs respecting operational conditions." *Proceedings of the 21st International Conference Light Svetlo 2015*, Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, 2015. pp. 49-52, ISBN: 978-80-214-5244-2.
- [A.7] ŠKODA, J.; SUMEC, S.; KRBAL, M.; BAXANT, P.; PAVELKA, T. "Comparison incandescent lamps with alternative light sources with E27 thread." *LUMEN V4 2014 - Proceedings*. 1. Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2014. pp. 93-98. ISBN: 978-963-9299-21-4.
- [A.8] PAVELKA, T.; ŠKODA, J.; BAXANT, P. "Historie LED." *Kurz osvětlovací techniky XXXI*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. pp. 165-169. ISBN: 978-80-248-3553-2.
- [A.9] PAVELKA, T.; KRBAL, M. "Design and construction of middle-frequency inductive heater for educational purposes." *Proceedings of the 14th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2013*. 1. edice. Ostrava, Czech Republic: VSB - Technical University of Ostrava, 2013. pp. 445-448. ISBN: 978-80-248-2988-3.
- [A.10] ŠKODA, J.; BAXANT, P.; KRBAL, M.; SUMEC, S.; PAVELKA, T. "Photometry of LED sources." *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013, roč. 89, č. 6/ 2013, pp. 341-344. ISSN: 0033-2097.
- [A.11] PAVELKA, T.; PTÁČEK, M.; BAXANT, P. "Photometrical Parameters of the Luminaire Used for Laboratory Measure of Low- Power Photovoltaic Modules." *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*. First edition. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, 2012. pp. 1181-1184. ISBN: 978-80-214-4514-7.

Úplný seznam autorových publikací je uveden v disertační práci.

ABSTRACT

Doctoral thesis deals with parameters of LED light sources and their static and dynamic changes due to variable operational conditions. Firstly there is briefly described the history of light emitting diodes, that brought LED from unintentional observation of luminescence to light source, which is generally used through the whole area of lighting techniques. Thesis focuses on light parameters analysis, which are specific for semiconductor light sources and their mutual relations. These relations in compliance with understanding the principles of light emission in semiconductor light sources enable establishing of basic connections and effects usable for LED behaviour model. Mutual relations of LED parameters and influencing factors are verified by measurement of chosen testing samples. For deeper understanding of diode parameter influencing mechanisms there are analysed current degradation models including degradation of partial components. On the basis of these facts there is created a model of LED luminaire operating with LED parameters together with cooling system that represent the integral part of the luminaire. Impact of supply drivers is also studied, because they are necessary for LED operation. Designed model supports the area of static changes of light parameters, as well as the dynamic changes of output parameters. Presented model is verified by testing measurements at basic operational states and partially outside of the common operational limits. There are also presented the possibilities of real use of the model that involve the evaluation of designed luminaire for specific light sources, searching for optimal operational limits, optimization of luminaire heatsink or using public lighting systems for regulation of electricity grid load fluctuations.